

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА ЗА СЧЕТ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ <sup>\*)</sup>

Абрамов И.С., Голубев С.В., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия, [abramov@ipfran.ru](mailto:abramov@ipfran.ru)

Спектры многозарядных ионов тяжелых газов характеризуются наличием узких пиков экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения [1]. Локализация пиков позволяет использовать для фокусировки сгенерированного излучения системы многослойных брэгговских зеркал, что открывает возможность практического применения этого излучения для литографии в экстремальном ультрафиолете [2]. Так, в частности, спектр  $\text{Xe}^{8+}$ – $\text{Xe}^{17+}$  имеет выделенный максимум в районе 11 нм, что соответствует пиковым коэффициентам отражения зеркал на основе бериллия и стронция [3, 4].

Одним из вариантов создания плазмы многозарядных ионов является импульсный лазерный разряд в газовой струе [5–7]. Излучение лазера остро фокусируют в плотном газе, обеспечивая в фокальной области развитие пробоя, существенный нагрев электронов излучением лазера и, как следствие, эффективную последовательную многократную ионизацию электронным ударом. Тем самым получают точечный источник экстремального ультрафиолетового излучения с эффективностью генерации свыше 1%.

В настоящей работе представлены результаты моделирования лазерного разряда в струях тяжелых газов [8]. Показано, что разряд распространяется за пределы фокальной области вследствие фотоионизации окружающего газа ЭУФ излучением многозарядных ионов и последующего нагрева электронов фотоионизированной плазмы потоком тепла из фокальной области за счет электронной теплопроводности [9]. Построена модель, обеспечивающая согласованное описание распространения разряда за счет указанного механизма с основными аспектами динамики разряда, включая пробой газа, нагрев электронов на упругих столкновениях с ионами, элементарные процессы ионизации и возбуждения многозарядных ионов электронным ударом, перенос линейчатого излучения ионов в объеме разряда и окружающем разряд нейтральном газе. Продемонстрировано согласие результатов моделирования с доступными экспериментальными данными, подтверждающими теоретическую концепцию об определяющем влиянии эффекта распространения разряда за пределы фокальной области на спектральный состав излучения разряда. Найдены режимы горения разряда, оптимальные для генерации излучения ЭУФ диапазона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00270).

### Литература

- [1]. Nechai A.N. et al., *Opt. Spectrosc.*, 2021, 129, 363–368.
- [2]. Bakshi V. (ed.), *EUV Sources for lithography*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2006, 1057 p.
- [3]. Chkhalo N.I. and Salashchenko N.N., *AIP Adv.* 2012, 3, 082130.
- [4]. Shaposhnikov R.A. et al., *Opt. Lett.*, 2022, 47(17), 4351–4354.
- [5]. Kalmykov S.G. et al., *J. Appl. Phys.*, 2019, 126, 103301.
- [6]. Guseva V.E. et al., *Appl. Phys. B*, 2023, 129, 155.
- [7]. Kalmykov S.G. et al., *J. Phys. D*, 2022 55, 105203.
- [8]. Abramov I.S. et al., *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123, 193502.
- [9]. Господчиков Е.Д., Абрамов И.С., Голубев С.В., Шалашов А.Г., О структуре фронта разряда высокого давления, распространяющегося за счет фотоионизации собственным экстремальным ультрафиолетовым излучением, 51 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2024 г.

<sup>\*)</sup> [DOI – тезисы на английском](#)